

探空火箭與酬載的回收

莊智清

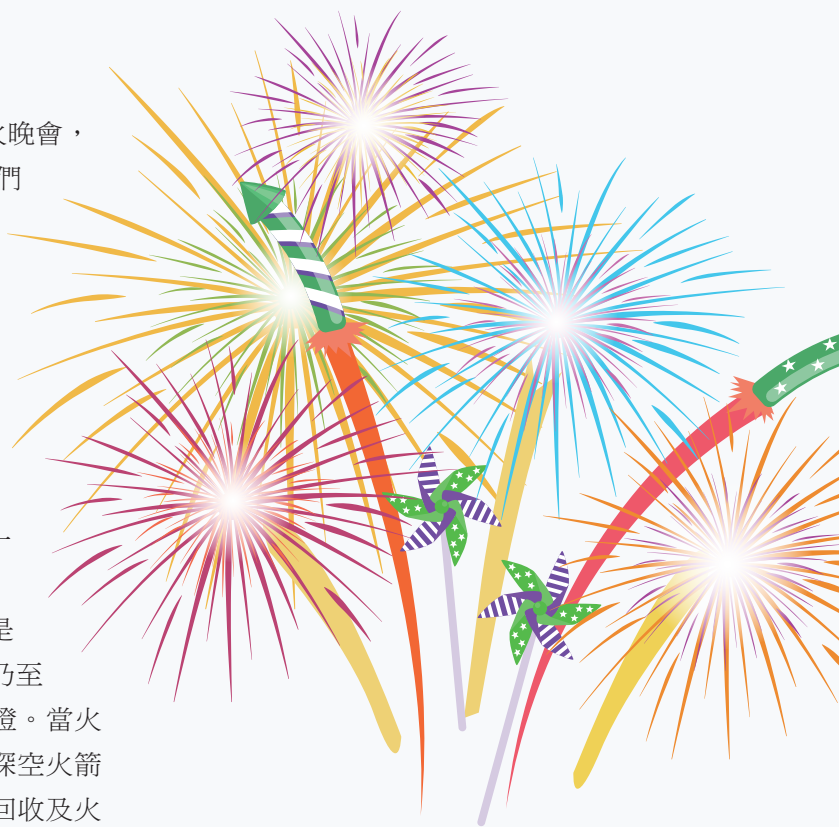
探空火箭的發射除了需把火箭成功送到設定的高空軌道外，還要能有效地進行資料、酬載及火箭的回收。

回收的必要

每逢節慶，許多團體都熱中於舉辦煙火晚會，不同型式與顏色的煙火照耀天際，激發人們無限的想像、美麗的願景與深層的希望。探空火箭的發射也是一項願景與希望的呈現。

探空火箭的發射與煙火的施放雖都能激發熱情，但本質上有相當程度的差異。除了技術挑戰與系統整合外，探空火箭具有回收功能。探空火箭飛過必留下痕跡，也因此執行任務時，有必要把這一過程中的資料、酬載乃至火箭回收。

探空火箭和次軌道科學的研究，主要是希望應用火箭把科學和工程酬載送至數十乃至一、兩百公里以上的高空，進行實驗與驗證。當火箭發射後，一系列的回收工作於焉展開。探空火箭與酬載的回收可再細分為資料回收、酬載回收及火箭回收。



探空火箭與酬載的資料類型分為工程資料與科學資料，前者主要是火箭諸元的運作情形，後者則是觀測儀器的紀錄。



資料回收、酬載回收及火箭回收示意圖。

資料回收

探空火箭與酬載的資料類型分為工程資料與科學資料，前者主要是火箭諸元的運作情形，後者則是觀測儀器的紀錄。探空火箭發動機的溫度、壓力與推力是重要的設計資料，火箭飛行的位置軌跡、速度變化與旋轉特性，以及攸關是否正常動作的各部件與閥件狀態，也是不可或缺的工程資料。科學資料的內容則包含所觀測的大氣層與電離層的光學、電學、磁學與化學資料，可以用影片、影像、類比波形和數位資料串的方式記錄。

工程與科學資料必須藉由無線通訊方式，在飛行過程中即時傳送至地面接收站，由地面接收站接收並監控與顯示。有些地面接收站也具備傳送指令的功能，可命令探空火箭與酬載執行特定動作。

一般通訊系統的頻寬與資料傳輸率都有限制，探空火箭和酬載與地面的通訊系統因此需妥適規劃資料封包格式與內容以傳回資料。探空火箭在加速上升過程中會產生相當幅度的都卜勒頻移，地面站的接收機須能因應這一變化。



火箭與酬載的工程和科學資料經由無線通訊傳送至地面接收站，把訊號解調、資料解碼並即時顯示。

另外，為了克服火箭旋轉造成電波輻射場型的變異，天線的設計也是重點。有些探空火箭可以應用專屬的頻率進行資料通訊，但也有些探空火箭採用業餘無線電頻段進行通訊。前者優點是頻道是專屬，比較不會受到干擾，但申請頻段程序較繁複。有些專屬頻段的通訊機並不容易購置，必須自行發展。所幸近年來軟體定義無線電技術有長足進步，可以應用軟體更改通訊的頻率、調變方式、電碼格式與資料內容，增加設計的靈活度。

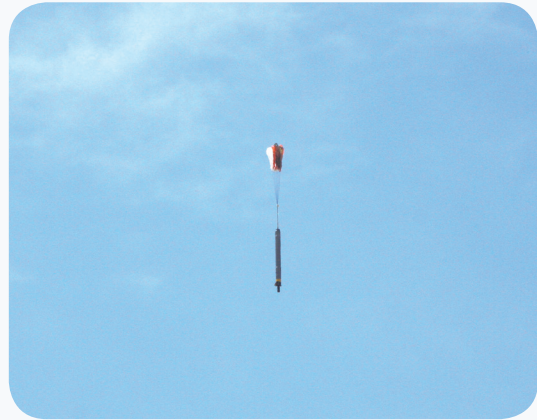
火箭飛行軌跡可以用地面雷達追蹤，取得火箭的距離、方位角與俯仰角，以方便重建飛行軌跡，但雷達的涵蓋範圍與精度往往受限。目前，也可在火箭上安置 GPS 接收機，得到位置與速度後把資料傳回地面。但目前商用 GPS 接收機因為受到管制，無法在 18 公里以上高空、每小時 1,900 公里以上的速度或 4 G 以上的加速度情況下運作，而一般探空火箭大都會超出這一範圍。因此如欲應用 GPS 接收機以記錄探空火箭和酬載的位置與速度，就需自行發展高動態 GPS 接收機。

成功大學團隊於數次探空火箭實驗中已成功驗證所發展的高動態 GPS 接收機，這一定位通訊模組整合通訊與衛星導航功能於一身，可以回報所處位置、速度與時間，並可搭配慣性感測元件，以量測探空火箭與酬載的加速度與轉速，有利於姿態的重建。而定位通訊模組的天線，則已發展出電波輻射場型良好且不影響飛行動態的刀型天線，並驗證 200 公里以上的傳送能力。

酬載回收

火箭的酬載段一般安裝珍貴的科學儀器，可在探空火箭升空、飛行與下降過程中觀測並記錄科學資料。這些資料除了可藉由前述的通訊系統回收外，若能把酬載回收就可增加資料的內容與數量，因為一般通訊系統的頻寬與資料傳輸率都有所限制，而酬載的記憶體容量則可適度擴充。

酬載回收的方式很多，關鍵是如何降低酬載著陸的撞擊力，以及如何快速掌握著陸點。飛得越高摔得越重，為了減低



運用降落傘回收探空火箭與酬載

落地的衝擊，就需導入外力以抗拒重力。外力產生的方式如增加阻力、應用浮力或進行推進。阻力與大氣流場有關，有些探空火箭與酬載下降時，在特定高度或時間可以啟動脫離機制，並藉由彈性繩索連結脫離的各段火箭。這時由於流場被破壞與重心變化，探空火箭與酬載一般會以滾轉型式下降而非直線下降，下降速度因而降低，再利用繫留的風帆或緞帶增加阻力。

降落傘型的回收是最常見的酬載回收方式，在擇定的飛行高度或時間開啟降落傘，增加阻力來降低酬載下降速度，酬載最後便可以較低的撞擊速度回到地面。若姿態控制得宜且火箭搭配有控制翼面，則可以利用氣動力控制火箭的飛行動態，產生浮力進行滑翔降落。酬載也可以搭載微型推進系統如過氧化氫，推進產生推力來抗拒重力。微型推進系統若設計得當，可以控制酬載至特定落點降落。若沒有這一控制機制，則酬載需加裝發報機傳送信標訊號，以利鎖定落點以便回收。

火箭的酬載段安裝珍貴的科學儀器，可在升空、飛行與下降過程中記錄科學資料，若能把酬載回收就可增加資料的內容與數量。

可重複使用的火箭回收本於循環經濟，
可大幅降低火箭發射成本，儼然成為太空探索的主流發展方向。

火箭回收

可重複使用的火箭近年來相當受到重視，前述回收酬載的目的是為了取得完整的科學與工程資料，而可重複使用的火箭回收則本於循環經濟，可大幅降低火箭發射成本，儼然成為太空探索的主流發展方向。

大型運載火箭的回收可分為助推火箭回收與主火箭回收。助推火箭回收發展較久，美國太空梭的助推火箭利用降落傘回收，其過程與前述利用降落傘回收酬載類似。但太空梭的助推火箭由於回收時一般都是落在海面上，會受到海水鹽分的侵蝕，需經複雜工序才可重複使用，且次數有限。這一回收可以加裝安全氣囊，當助推火箭於平流層分離並燃盡剩餘燃料之後，利用降落傘降低下落速度，並於離地面數十公尺時開啟安全氣囊，減緩撞擊力也阻絕海水浸泡。

火箭脫離地表的關鍵是擁有足夠的推力以抗拒地心引力而升空，主火箭回收的關鍵則是具有精準的控制能力以平衡地心引力與擾動而優雅地著陸。主火箭回收過程相當複雜，因為下降時處於不穩定的狀態，稍微施力或控制不當，火箭就會急速翻滾。

控制下降與回收過程需結合主發動機，以不時產生推力來抗拒地心引力，並減緩下降速度，應用控制翼面以加強氣動力的穩定，並調整飛行路徑，以降落到所規劃的降落平台，同時控制側向推力以維持姿態與調整軌跡。這一控制系統目前已確認其可行性，有助於發射成本的降低。

在主火箭回收過程中，當火箭在最高點或平飛時需要進行大翻滾，以調整火箭姿態而利於下降。翻滾主要是利用混合火箭或微型推進裝置產生側向推力來達成，完成翻滾後則希望控制火箭維持與升空時相似的姿態下降，如此主發動機才得以調節下降速度。

主火箭在回收過程中是處於垂直姿態，相當於動力學的倒單擺系統。這系統是非線性、不穩定且非最小相位的系統，欲維持垂直姿態下降需利用主動控制，即利用GPS接收機決定位置與速度，並利用陀螺儀與加速計推算姿態，以及混合推力與氣動力的控制。值得注意的是，主火箭下降的速度相當快，因此控制翼面的設計與驅動有一定的困難。

主火箭著陸的最後一哩路是控制問題，這時若有小小異常往往很難修正，因此主火箭的回收相當有挑戰性。但經由精確可靠的控制，整個運載火箭發射的循環經濟得以實現。探空火箭目前一般僅嘗試應用降落傘回收，但隨著技術的成熟，爾後應有垂直著陸的回收方式。

一般探討探空火箭技術，人們會關心發動機的推力與飛行的高度，但完整的探空火箭系統設計與整合才是任務成功的關鍵。這其中，資料回收、酬載回收及火箭回收是控制與通訊工藝的展現。

莊智清
成功大學電機工程學系
